

## ミリ波無線用デバイスとモジュール化に関する研究

著者	丸橋 建一
号	52
学位授与番号	3871
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37587">http://hdl.handle.net/10097/37587</a>

氏 名	まる はし けん いち
授 与 学 位	丸 橋 建 一
学位授与年月日	博士（工学）
学位授与の根拠法規	平成19年9月12日
研究科，専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気・通信工学専攻
指 導 教 員	ミリ波無線用デバイスとモジュール化に関する研究
論文審査委員	指導教員 東北大学教授 坪内 和夫
	主査 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 澤谷 邦男
	東北大学教授 高木 直

## 論 文 内 容 要 旨

本論文では、ミリ波無線システムに適用するデバイスとモジュールにおいて、性能の向上と同時に低コスト化を重視し、製造時の性能ばらつきを抑え、安価な製造プロセスで形成可能なモジュール構造を提案・実証し、生産性向上に結びつく研究成果を示した。

第1章では、今後期待されるミリ波デバイス・システムの民生機器への応用を促進するためには低価格化が重要となり、これを実現するためには量産規模の拡大が必須であることを述べた。技術的な要件としては、設計が容易で、製造時に性能がばらつかず、生産スループットが確保できるミリ波デバイス、モジュール技術を開発することが重要であると述べた。

第2章では、低雑音増幅器において、ミリ波で動作する MMIC(マイクロ波・ミリ波モノリシック集積回路)ならではの課題や設計のポイントを指摘し、その解決のためのアプローチを論じた。具体的には、トランジスタ利得が低くなるミリ波において、相対的に寄生成分の影響が大きくなることを踏まえ、雑音測度に着目してトランジスタのサイズに関する最適な選択手法を明らかにした。さらに Lange カプラやアイソレータを不要化するために、直列帰還線路を導入し、雑音測度を最小にしながら入力無反射特性が得られる整合回路を最適化する明確な手法を開発した。また MMIC で用いられる FET のしきい値ばらつきによる電流変動を従来比 58%に抑え、広範囲の電源電圧で駆動できる自己バイアス回路につ

いての提案を行った。これらの技術を用いて設計、試作した 60GHz 帯低雑音増幅器 MMIC では、周波数 60GHz における雑音指数 3.2~3.7dB、利得 17.2~18.3dB が得られた。直列給電型 30GHz 帯低雑音増幅器 MMIC では、周波数 30GHz で入出力の反射係数がともに -14dB 以下、周波数 27~31GHz で雑音指数  $1.6 \pm 0.2$ dB、利得 20dB 以上が得られた。

第 3 章では、指向性が強いミリ波システムにおいて、ユーザーによる設置時のアンテナ方向合せを不要とし、ネットワークの柔軟性やユーザーの利便性をもたらすビームフォーミングのキーコンポーネントとなる移相器の研究について述べた。特に制御が簡単で、温度に対しても性能が変化しづらいデジタル移相器を対象とし、集積回路における小型化と設計性の観点から非共振型 FET スイッチに着目し、これがミリ波移相器に適したものであることを示した。さらに実際の Ka 帯 4 ビット移相器 MMIC の試作を通して、その有用性を示した。

第 4 章では、量産に適し、比較的複雑な構造を形成しやすいセラミック基板を用いたミリ波モジュールのコンセプトを新たに提案した。その特徴は、多層セラミック基板技術を用いてチップ間接続線路、DC、ベースバンド信号、無線信号用の外部端子、平面回路を収容するキャビティなどの構造をセラミックプロセスで一括形成することによって、部品点数や、製造工程数を削減したこと、最短接続が可能なフリップチップ実装技術を適用し、ミリ波帯における接続再現性を高めたこと、セラミックプロセスとして、数 $\mu\text{m}$  から数十 $\mu\text{m}$  の微細パターンを精度良く形成する薄膜配線技術ではなく、最小線路幅/最小線路間隔のルールは緩い( $\sim 0.1\text{mm}$ )が多層化に向き、スクリーン印刷工法を利用した厚膜配線技術を用いて生産性を高めたこと、である。セラミック基板上に形成する接続用のコプレーナ線路は厚膜配線で形成するため、TEM 波が仮定できる周波数が比較的低く、さらにはパッケージ内に形成する際には漏洩モード(leaky mode)が生成しやすくなるという課題が生じる。これを解決するために、新規に埋込コプレーナ線路を提案し、TEM 波近似の適用周波数上限(従来約 30GHz)を約 90GHz に引き上げ、その解析を行った。さらにはこれを内蔵したフリップチップ実装対応ミリ波モジュール構造を具体化した。

第5章では、変調方式としてはASK(Amplitude Shift Keying)を用い、1Gbps以上の超高速無線モジュールを実現するためのレベルダイアグラム、MMICチップセットについて述べた。さらに第4章で具体化したモジュール構造を適用し、世界で初めてとなる厚膜配線技術を利用したミリ波フリップチップ実装モジュールを実現した。システム応用として、IEEE1394を無線化するアダプタと、伝送速度が1.285Gbpsである高精細画像伝送システムの試作例を提示し、本モジュールの性能がいかに発揮されていることを確認した。このモジュール構造は、実装するMMICを変更することで、ASK以外の変調方式にも対応できており、製品化も行われていることから、汎用性と実用性についても実証されている。

# 論文審査結果の要旨

将来のユビキタス社会では、端末に多様な無線通信方式が搭載され、シームレスな無線アクセス環境を提供できる技術が重要視される。この中であって、ミリ波を用いた通信システム技術は、超ギガビット伝送が可能であることから、その実用化が期待されている。本論文は、ミリ波技術の大きな課題である低コスト化を重視し、高性能化と、生産性の高いミリ波デバイス、モジュールの提案・実証を目的とする研究をまとめたものであり、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、低雑音増幅器 MMIC において、低雑音化と低反射特性を得るために、アイソレータを不要とする回路構成を提案し、その有効性を明らかにしている。また、単一電源用バイアス回路を提案し、バイアス回路の簡略化、並びに FET しきい値ばらつきが電流に及ぼす影響を従来比 58% に低減できることを試作を通して実証した。これらはマルチチップモジュールへ適用する MMIC の技術として、極めて有用な成果である。

第 3 章では、指向性が鋭いミリ波アレイアンテナ素子において、各素子の方向合わせを不要とするフェーズドアレイ技術に必要な移相器について述べている。従来適用されてこなかった非共振型 FET スイッチに着目して検討し、これが集積回路の小型化と設計性能の観点からミリ波移相器に適していることを示した。さらに移相器 MMIC の試作を通してその有用性を示している。この成果は高く評価される。

第 4 章では、部品点数と製造工程数を削減するために、各種配線、接続端子などを多層セラミックプロセスで一括形成し、接続再現性に優れたフリップチップ実装技術を適用したミリ波モジュールのコンセプトを提案している。低コスト厚膜配線技術で形成するコプレーナ線路において線路の上部にもセラミック層を配置することにより TEM 波近似の適用周波数上限（従来約 30GHz）を約 90GHz に引き上げ、漏洩モードを抑圧した埋込コプレーナ線路を提案した。これらの技術を結集して実現した世界初の多層セラミック基板フリップチップ実装対応 60GHz 帯モジュールは、極めて高く評価される。

第 5 章では、前述のミリ波マルチチップモジュールの応用として送信・受信モジュールを試作し、その評価を行った結果が述べられており、ASK 変調と周波数分割多重を採用することにより、60GHz 帯において通信距離 12m で伝送速度 1.285Gbit/s のミリ波非圧縮高精細画像伝送システムを実現した。このシステムの一部は実用化されており、モジュールの汎用性と実用性を鑑みても、その成果は極めて重要である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、高性能化、低コスト化とともに、製造時の性能ばらつきを抑え、安価な製造プロセスで形成するミリ波デバイス、モジュール技術を提案し、その有効性を示したもので、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。